

DLR-IB-FA-BS-2019-44

**Experimentelle Untersuchung von
festigkeitsteigernden Maßnahmen
aus der Literatur an Überlappungs-
klebungen mit Filmklebstoffen
Projektarbeit**

Leichen, Benjamin
Schollerer, Martin Johannes



DLR

**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**



Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS-2019-44

**Experimentelle Untersuchung von festigkeitsteigernden
Maßnahmen aus der Literatur an Überlappungs-
klebungen mit Filmklebstoffen**

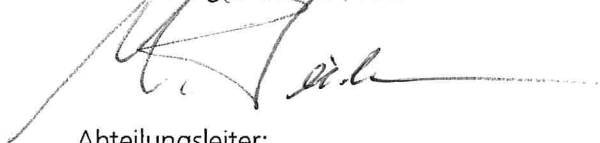
Zugänglichkeit:

Stufe 1 Allgemein zugänglich: Der Interne Bericht wird elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt. Falls vorhanden, ist je ein gedrucktes Exemplar an die zuständige Standortbibliothek und an das zentrale Archiv abzugeben.

Braunschweig, 03. 2019

Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann



Abteilungsleiter:

Prof. Dr.-Ing. Christian Hühne



Der Bericht umfasst: 35 Seiten

Autoren:

Benjamin Leichen



Betreuer:

Martin Schollerer, M.Sc



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Sperrvermerk

Die vorliegende Projektarbeit wurde innerhalb der Abteilung Funktionsleichtbau am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- & Raumfahrt e.V. in Braunschweig angefertigt und enthält firmeninterne Informationen und vertrauliche Daten. Sie darf aus diesem Grund ausschließlich zu Prüfungszwecken verwendet werden und ohne ausdrückliche Genehmigung durch das Deutsche Zentrum für Luft- & Raumfahrt weder Dritten zugänglich gemacht, noch ganz oder in Auszügen veröffentlicht werden.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Formelzeichen	5
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung, Zielsetzung, Nutzen	2
1.2 Vorgehensweise.....	2
2 Theoretische Grundlagen zu Überlappungsklebungen	3
3 Methoden der Spannungsreduktion (Stand der Forschung)	4
3.1 Gradientenklebung	4
3.2 Kleberkehle.....	5
3.3 Anfasen der Fügeteile	7
4 Vorbereitung zur experimentellen Untersuchung.....	8
4.1 Normen und Geometrie	8
4.2 Versuchsreihen.....	8
4.3 Materialauswahl und Kennwerte	11
4.4 Fertigung.....	13
4.4.1 Laminatfertigung	13
4.4.2 Fertigung der Fügevorrichtung.....	16
4.4.3 Verkleben	18
4.4.4 Untersuchung der Proben	19
5 Experimentelle Untersuchung	21
5.1 Versuchsbeschreibung und Aufbau.....	21
5.2 Durchführung.....	22
5.3 Beobachtung.....	22
5.4 Ergebnisse und Vergleich der Spannungen.....	22
5.5 Bruchbild.....	24
5.6 Aramis Auswertung	26
6 Diskussion	29
7 Fazit und Ausblick.....	30

8	Literatur	31
9	Anhang.....	33

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1: Entwicklung des globalen CFK-Bedarfes.....	1
Bild 2.1: Spannungsverlauf einer Überlappungsklebung	3
Bild 3.1: Schubspannungsverlauf einer Gradientenklebung	4
Bild 3.2: Mittlere Schubspannungen verschiedener Einzel- und Hybridklebungen	5
Bild 3.3: Von Lang und Malick untersuchte Geometrien.....	6
Bild 3.4: Normale Fase	7
Bild 3.5: Invertierte Fase	7
Bild 4.1: Geometrie der einzelnen Proben.....	8
Bild 4.2: Ergebnis der Voruntersuchung	9
Bild 4.3: Bild: Überlappungsbereich der einzelnen Probenreihen.....	10
Bild 4.4: Probenbezeichnung.....	11
Bild 4.5: Gelegtes Laminatpaket	14
Bild 4.6: In Trennfolie eingeschlagenes Laminat	14
Bild 4.7: Vakuumaufbau	15
Bild 4.8: Vakuumaufbau für das Aushärten des Laminats	15
Bild 4.9: Aushärtezyklus Hexply 8552.....	16
Bild 4.10: Definierende Kanten der Fügevorrichtung links Bogen rechts Dreieck	17
Bild 4.11: Fügevorrichtungen.....	17
Bild 4.12: Fügeteile mit Fügevorrichtung und Bohrungen	18
Bild 4.13: Vakuumaufbau für die Verklebung	19
Bild 4.14: Mikroskopaufnahmen der Klebegeometrien der Schliffproben.....	20
Bild 5.1: Versuchsaufbau	22
Bild 5.2 Beispiele für die Bruchbilder der einzelnen Versuchsreihen	25
Bild 5.3: Dehnungen der Probe ECHO_SLS_TEN_RT_4_2	26
Bild 5.4: Vergleich der Dehnung kurz vor dem Bruch nach v. Mises	27
Bild 5.5: Vergleich der „Schäldehnungen“ kurz vor dem Bruch.....	28
Bild 6.1: Rissbildung bei der Probe ECHO_SLS_TEN_RT_3_5	29

Abkürzungsverzeichnis

DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
HLFC	Hybrid Laminar Flow Control
ECHO	Evaluation of a Certified HLFC Elevator Operation
UD	Unidirektional
Prepreg	Preimpregnated fibres
FVK	Faserverbundkunststoff

Formelzeichen

τ	Schubspannung
G_K	Schubmodul des Klebstoffes
t_a	Klebstoffdicke
t_s	Fügeteildicke
$l_{\bar{u}}$	Überlappungslänge
τ'_{ϵ}	Schubspannung infolge der Fügeteildehnung
τ'_{ν}	Schubspannung infolge der Fügeteilverschiebung
σ_Z	Normalspannung bzw. Schälspannung
τ_K	Klebfestigkeit
E	Elastizitätsmodul
F	Kraft
t	Fügeteildicke
t_a	Klebstoffdicke
b	Fügeteilbreite
F_{Br}	Bruchkraft
A_K	Klebfäche
ε_{DMS}	Maximale Dehnung, die durch den DMS aufgezeichnet wurde

1 Einleitung

Aufgrund des geringen Gewichts bei vergleichsweise hohen Festigkeit werden carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) immer häufiger in der Industrie eingesetzt. Am häufigsten wird dieser Werkstoff in der Luft- und Raumfahrt, bedingt durch die zentrale Bedeutung des Leichtbaus in diesem Bereich, eingesetzt. Aber auch in der Automobilbranche, dem Bauwesen und dem Bereich Sport & Freizeit gewinnt er immer mehr an Bedeutung. [1]

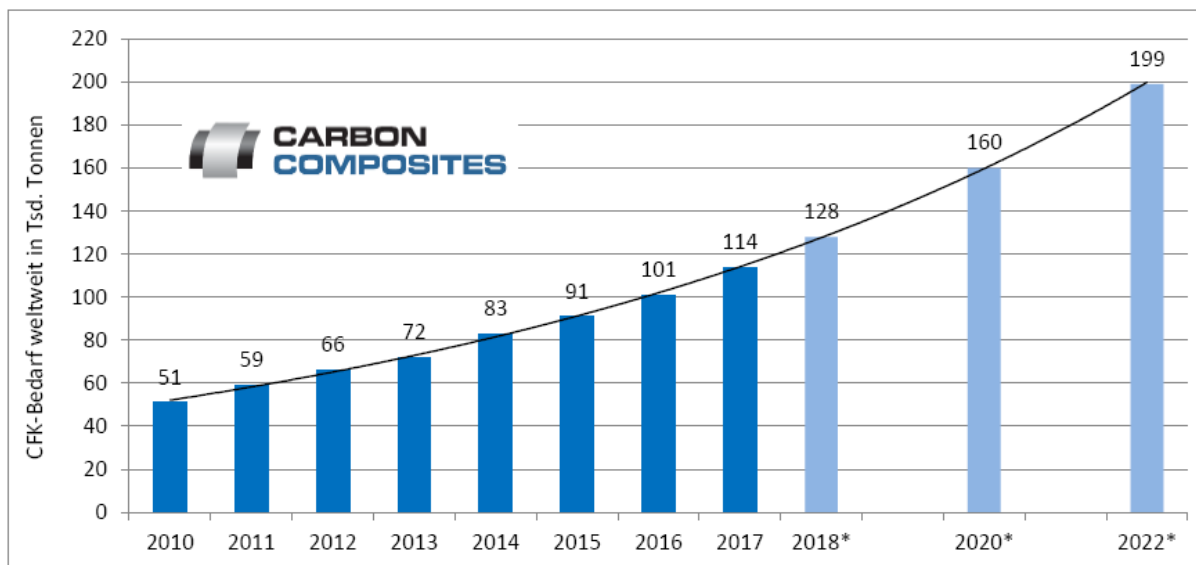


Bild 1.1: Entwicklung des globalen CFK-Bedarfes *(Schätzung) [1]

Durch den so immer weiter wachsenden Bedarf an CFK-Strukturen wächst auch der Bedarf an Fügemethoden für diesen Werkstoff.

Die Klebeverbindung stellt eine Alternative zu den herkömmlichen Verbindungselementen wie Bolzen oder Nieten dar. Gerade im Leichtbau eignet sich die Klebeverbindung insbesondere, da sie sich besonders für die Verbindung von dünnwandigen und flächigen Strukturelementen eignen, die in diesem Bereich hauptsächlich genutzt werden. [2]

Allerdings bringt die Auslegung dieser Verbindungen Schwierigkeiten mit sich, die es weiter zu erforschen gilt.

Im Rahmen des EU-Projektes Clean Sky 2 soll, am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, ein Demonstrator für eine Hybrid Laminar Flow Control (HLFC)-Struktur entwickelt werden. Bei ersten Fertigungsversuchen traten jedoch Probleme bei den Klebeverbindungen auf. Schon bei niedriger Belastung versagten diese, bedingt durch hohe Spannungsspitzen an den freien Enden. Nun soll eine Möglichkeit gefunden werden entsprechende Spannungsspitzen zu minimieren.

1.1 Aufgabenstellung, Zielsetzung, Nutzen

Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Methoden zur Reduktion der Spannungsspitzen von Überlappungsklebung experimentell zu untersuchen und diese miteinander zu vergleichen. Die hier untersuchten Methoden sind aktuell Stand der Forschung und wurden bisher entweder nur auf theoretischer Basis oder mit anderen Werkstoffen experimentell untersucht.

1.2 Vorgehensweise

Zu Beginn dieser Arbeit werde ich auf die theoretischen Grundlagen der Überlappungsklebung eingehen und das Problem der entstehenden Spannungsspitzen erläutern. Anschließend werde ich darauf eingehen, welche Methoden zur Reduktion dieser Spannungsspitzen aktuell Stand der Forschung sind und welche Ergebnisse bisher erzielt wurden. Außerdem wird erläutert welche Methoden in dieser Arbeit experimentell untersucht werden sollen. Danach gehe ich auf die Vorbereitung der Untersuchung und die Fertigung der Proben ein. Im Endteil dieser Arbeit werden die Versuchsdurchführung sowie die Messergebnisse dargestellt, ausgewertet und diskutiert.

2 Theoretische Grundlagen zu Überlappungsklebungen

Das grundlegende Problem bei der Auslegung von Überlappungsklebungen ist das Auftreten von Spannungsspitzen an den Überlappungsenden der Klebung. Diese Spannungsmaxima stellen dabei oftmals das versagensinitiierende Kriterium für die Auslegung solcher Verbindungen dar.

Durch eine Reduktion dieser Spannungsspitzen könnte eine Überlappungsklebung eine weitaus größere Belastung aushalten oder die Klebefläche kleiner ausgelegt werden, wodurch Gewicht gespart werden könnte.

Die Spannungsspitzen resultieren einerseits aus Schubspannungen durch die angreifenden Kräfte, Zug- und Schubspannungen, die durch die Fügeiteildehnung entstehen, sowie Normal- bzw. Schälspannungen durch das auftretende Moment.

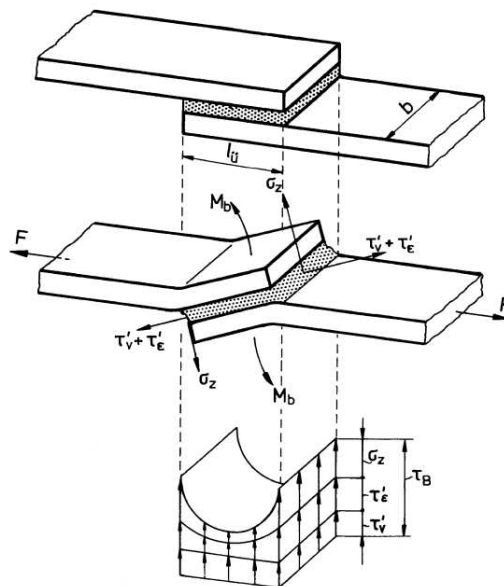


Bild 2.1: Spannungsverlauf einer Überlappungsklebung

3 Methoden der Spannungsreduktion (Stand der Forschung)

3.1 Gradientenklebung

Bei der Gradientenklebung (auch Hybride- oder Kombinationsklebung genannt) werden Klebstoffe mit unterschiedlichem Schubmodul verwendet, um die Spannungsspitzen an den freien Rändern zu reduzieren.

Klebstoffe mit niedrigeren Schubmodul werden im Randbereich verwendet, um so die Spannungsspitzen zu reduzieren. Zusätzlich werden Klebstoffe mit höherem Schubmodul im mittleren Bereich der Klebung verwendet, um die Festigkeit der Klebung zu gewährleisten.

Idealisiert betrachtet müsste man den Schubmodul kontinuierlich über die gesamte Klebefläche anpassen, um den bestmöglichen Schubspannungsverlauf zu erreichen.

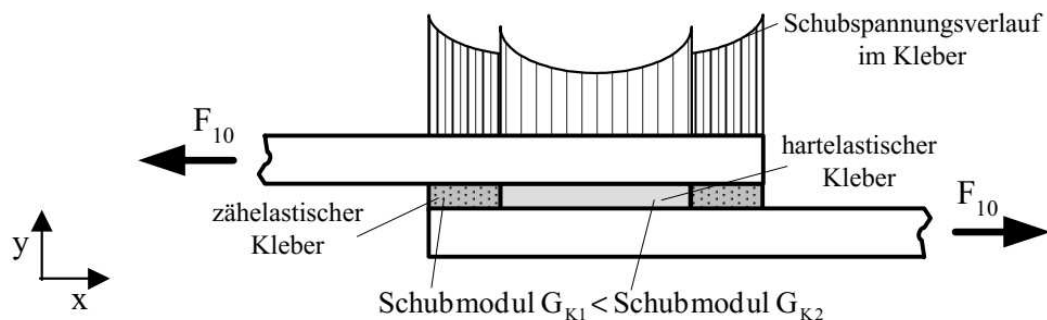


Bild 3.1: Schubspannungsverlauf einer Gradientenklebung [2]

Diese Methode der Spannungsreduktion wurde bereits numerisch als auch experimentell untersucht, weswegen sie in dieser Arbeit nicht untersucht wird. [3–5]

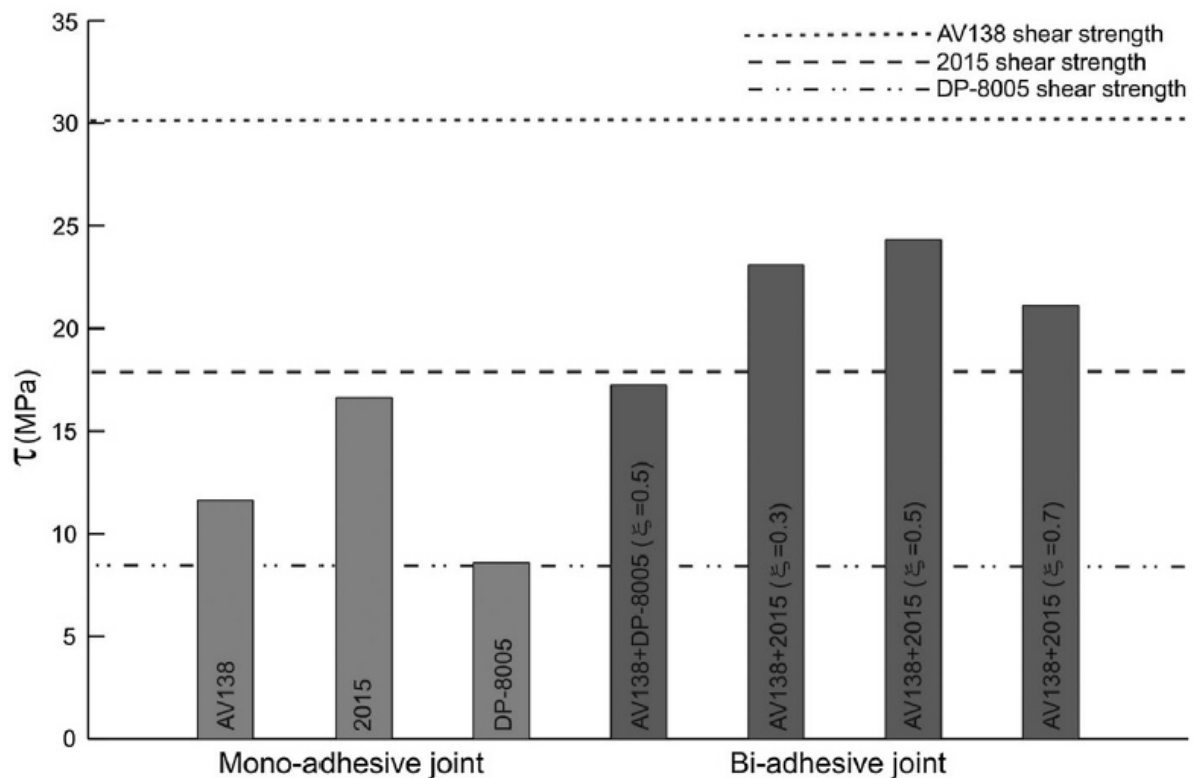


Bild 3.2: Mittlere Schubspannungen verschiedener Einzel- und Hybridklebungen aus der experimentellen Untersuchung von Özer & Öz [5]

3.2 Kleberkehle

Bedingt durch das Fertigungsverfahren wird beim kleben häufig Klebstoff aus der Fuge hinausgepresst. Die so entstehende Kleberkehle kann eine spannungsreduzierende Wirkung auf die Klebeverbindung haben. Dies zeigte schon 1959 ein Ermüdungsschwellversuch von Matting und Draugelates bei dem eine Steigerung der Bruchlast-Spielzahl um den Faktor 7, im Vergleich zu einer Überlappungsklebung ohne Klebstoffauslauf, festgestellt wurde. [6]

Sowohl Rispler et al. [7] als auch Lang und Mallick [8] haben bereits analytische Untersuchungen zum Einfluss der geometrischen Form der Kleberkehle auf die Spannungen durchgeführt. In Bild 3.3: Von Lang und Malick untersuchte Geometrien [8] sieht man die untersuchten Geometrien sowie ihre Ergebnisse (Tabelle 3.1: Ergebnisse der FEM Untersuchungen von Lang und Mallick (Prozentuale Reduktion der Spannungsspitzen in Bezug zu einer Normalen Überlappungsklebung) [8]). Dabei erkennt man, dass die Bogengeometrie (Arc), das „volle Dreieck“ (full triangular), sowie die „volle, runde Form mit kehle“ (full round with fillet) die besten Ergebnisse erbringen.

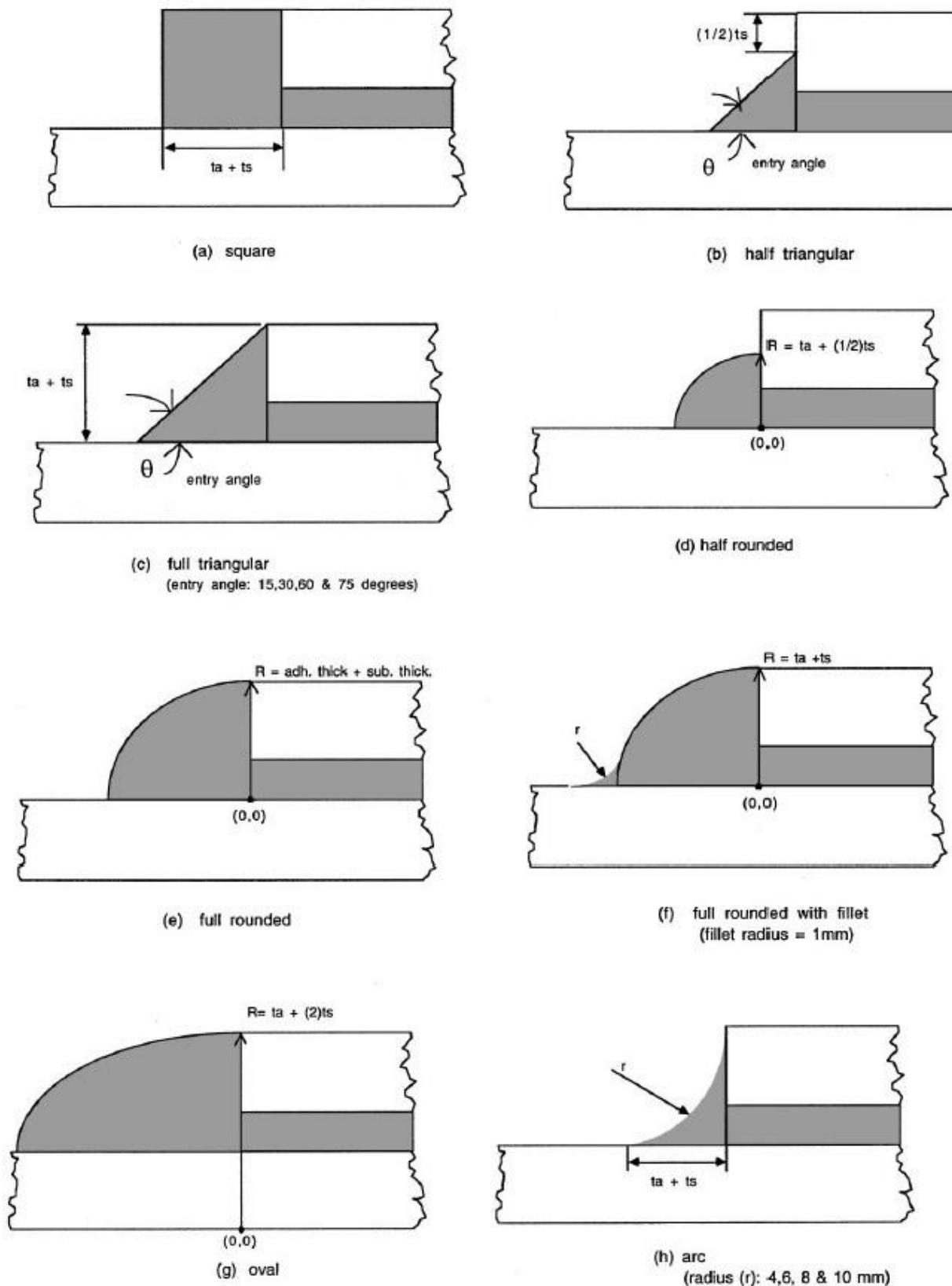


Bild 3.3: Von Lang und Malick untersuchte Geometrien [8]

Tabelle 3.1: Ergebnisse der FEM Untersuchungen von Lang und Mallick (Prozentuale Reduktion der Spannungsspitzen in Bezug zu einer Normalen Überlappungsklebung) [8]

Spew geometry	τ_{xy} (%)	σ_{yy} (%)	σ_{xx} (%)
Half triangular ($\theta = 45^\circ$)	45	71	28
Full triangular ($\theta = 45^\circ$)	50	73	31
Half rounded	29	33	15
Full rounded	37	42	20
Full rounded with fillet	54	82	36
Oval	49	65	32
Square	37	40	19
Arc (radius = 6 mm)	60	87	35

3.3 Anfasen der Fügeteile

Auch das Anfasen der Fügeteile kann zu einer Reduktion der Spannungsspitzen führen. Dabei gibt es zwei unterschiedliche Möglichkeiten der Anfasung. Einmal die „normale“ Anfasung bei der sich das Fügeteil zur Klebung hin verjüngt und einmal die „invertede“ Anfasung bei der sich das Fügeteil nach außen verjüngt.

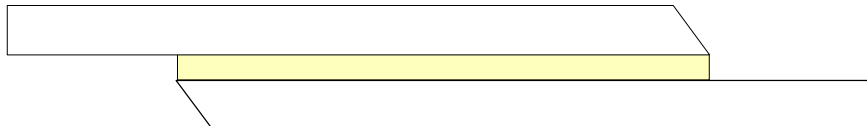


Bild 3.4: Normale Fase

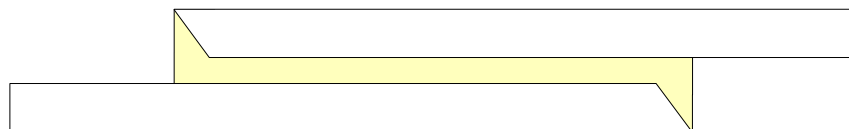


Bild 3.5: Invertierte Fase

Durch die größere Klebschichtdicke am Ende der Überlappung bei der invertierten Fase wird die Nachgiebigkeit dort lokal reduziert, was zu einer Spannungsreduktion führt.

4 Vorbereitung zur experimentellen Untersuchung

4.1 Normen und Geometrie

Die Proben werden in Anlehnung an die Norm ASTM 5868 [9] „Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding“ gefertigt. Hierbei handelt es sich um eine im Flugzeugbau gängige Norm zur Ermittlung der Klebfestigkeit von FVK Überlappungsklebungen.

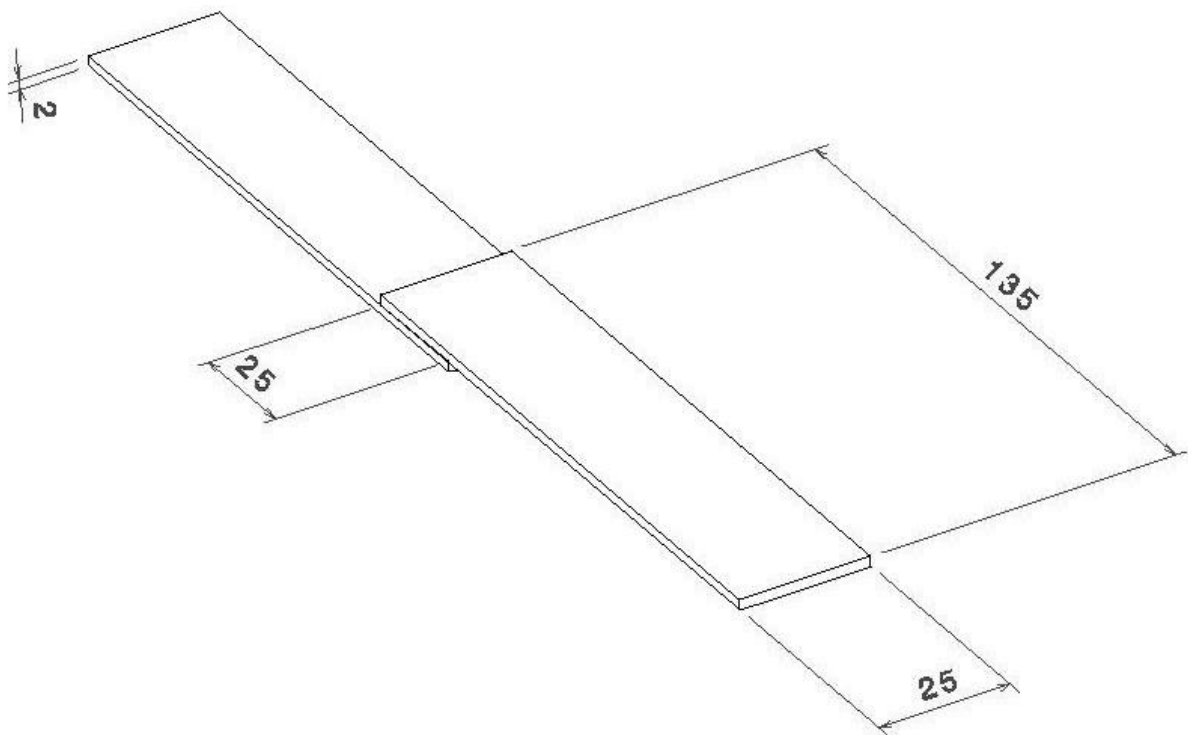


Bild 4.1: Geometrie der einzelnen Proben

4.2 Versuchsreihen

Für die Untersuchungen dieser Arbeit werden hier 1 Referenzreihe 2 verschiedene Kleberkehlen sowie eine Probenreihe mit „normaler“ Fase untersucht. Letztere wird untersucht um eine Grundlage für weitere Untersuchungen zu erhalten. Dabei könnte die Fase mit einer Kleberkehle kombiniert werden.

Die Geometrien werden aufgrund der Ergebnisse von Lang und Mallick (siehe Kapitel 3.2) ausgewählt.

Ausgewählt werden ursprünglich das „volle Dreieck“ und der Bogen. Da die Fertigung der zusätzlichen Kehle am Ende der „vollen Rundung“ zu aufwändig bzw. nicht möglich wäre, wird diese Geometrie nicht berücksichtigt.

Bei Voruntersuchungen zu einer vorhergehenden Versuchsreihe ergibt sich dazu, dass für ein volles Dreieck, bei der geplanten Versuchsanordnung, nicht genügend Klebstoff ausgepresst werden kann. Deshalb wird in dieser Arbeit die Geometrie „halbes Dreieck“ verwendet.

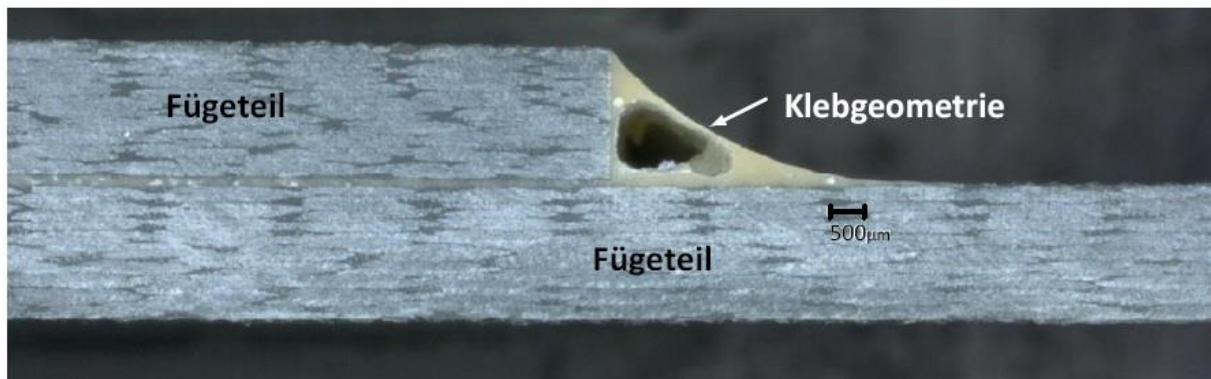


Bild 4.2: Ergebnis der Voruntersuchung [10]

Es werden insgesamt 4 Versuchsreihen mit jeweils 5 Proben gefertigt.

Bei der dreieckigen Kleberkehle handelt es sich um ein gleichschenkelig rechtwinkliges Dreieck, dessen Katetenlängen sich aus der Klebschichtdicke und der halben Fügeteildicke zusammensetzt. In diesem Fall beträgt die theoretische Klebschichtdicke 0,15 mm und die Fügeteildicke 2mm. Somit ergibt sich eine Katetenlänge von 1,15mm.

Die Bogengeometrie setzt sich aus einem 2mm Radius und einer Kantenlänge von 2,15mm zusammen. Dies entspricht der der Fügeteildicke + der Klebschichtdicke.

Bei der Fase handelt es sich lediglich um eine einfache 45° Anfasung.

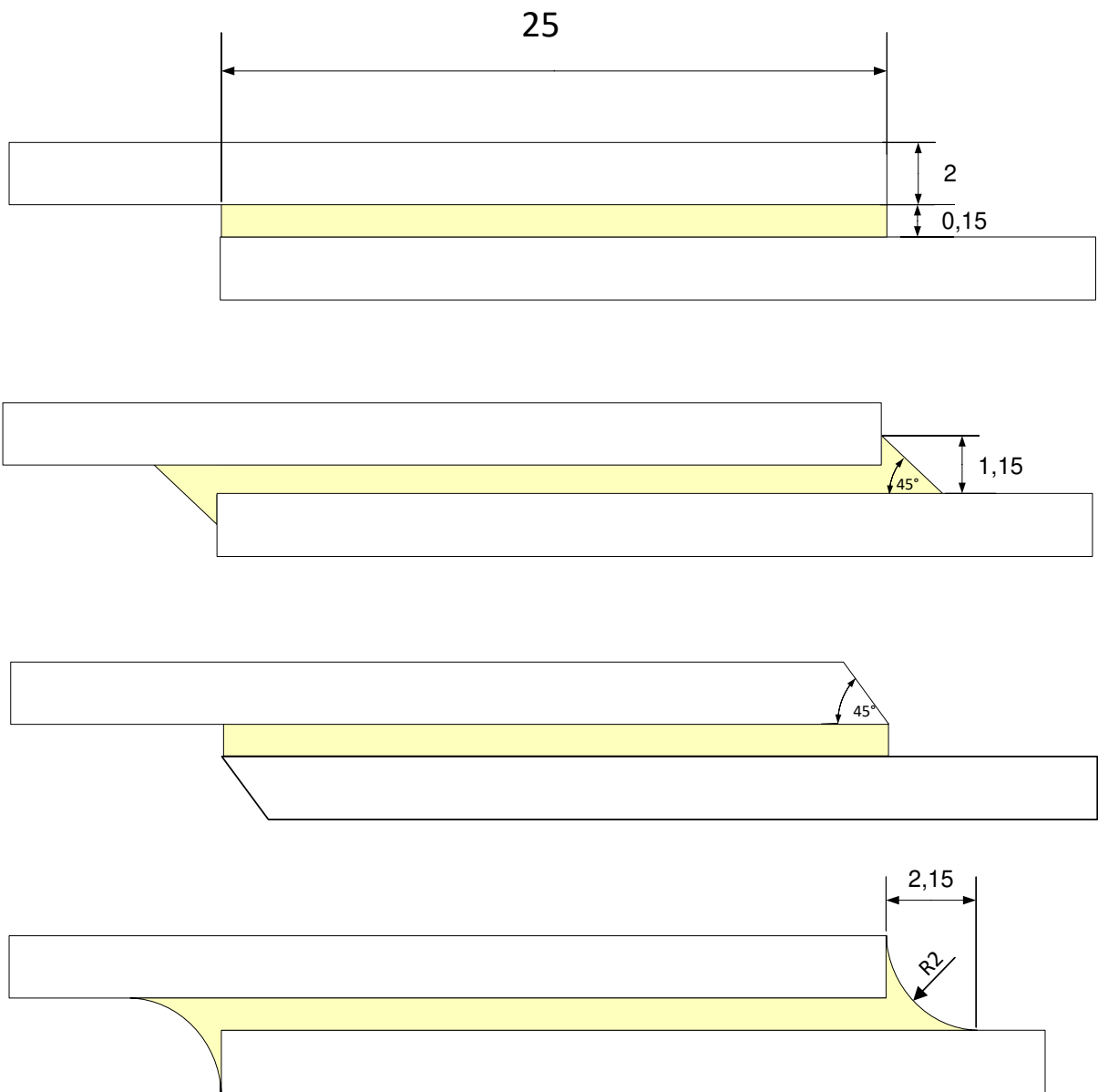


Bild 4.3: Bild: Überlappungsbereich der einzelnen Probenreihen

Die Proben werden nach folgendem Schema bezeichnet:

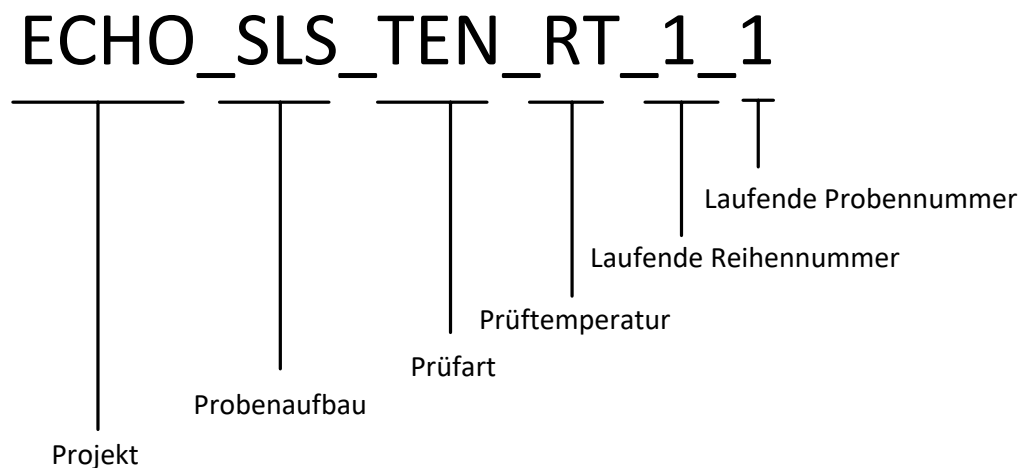


Bild 4.4: Probenbezeichnung

ECHO (*Evaluation of a Certified HLFC Elevator Operation*) ist hierbei der Projektname unter dem diese Versuche laufen.

SLS steht hier für *Single Lap Joint* also für eine einschnittige Überlappungsklebung.

TEN steht für *Tension* also Zug als Belastungsart.

RT steht für *Roomtemperature* also Raumtemperatur.

Die laufenden Reihenummern werden folgendermaßen zugeordnet:

- 1 Referenzreihe,
- 2 dreieckige Kleberkehle,
- 3 bogenförmige Kleberkehle,
- 4 angefastete Fügeteile.

4.3 Materialauswahl und Kennwerte

Da diese Untersuchungen im Rahmen des Flugzeugbaus stattfinden werden auch die Materialien für die Testreihen möglichst praxisnah ausgewählt.

Als Klebstoff wird der Epoxidklebstoff Loctite EA 9695 von der Firma Henkel gewählt. Hierbei handelt es sich um einen gängigen Struktur-Filmklebstoff. Der Klebstoff kann laut Hersteller bei einer Temperatur zwischen 121°C-177°C ausgehärtet werden. [11]

Tabelle 4.1: materialkennwerte des Filmklebstoffes Loctite EA 9695 0,05 psf [11]

E-Modul	2688,4 MPa
Schubmodul	987,7 MPa
Bruchspannung	58,14 MPa
Bruchdehnung	3,44 %
Filmdicke	0,15 mm
Flächengewicht	244 g/m ²

Als Fügeteilwerkstoff wird hier carbonfaserverstärkter Kunststoff verwendet. Eingesetzt wird dabei das unidirektionale Hexcel 8552 IM7 Prepreg mit einer Epoxidharzmatrix. Der Werkstoff soll nach Herstellerangaben bei einem Druck von 7 Bar und einer maximalen Temperatur von 180°C ausgehärtet werden. [12]

Ursprünglich sollte für diesen Versuchsaufbau ein klassisches Flugzeugbaulaminat mit einer 45° Außenlage verwendet werden. Allerdings waren die Ergebnisse dieser Probenreihen nicht Aussagekräftig, da alle Proben im Fügeteil gebrochen sind und nicht, wie gewünscht, in der Klebschicht. Die Proben zeigten dabei alle einen Bruch der ersten Laminatschicht.

Um dieses Problem zu vermeiden wird der Lagenaufbau leicht abgeändert. Im Gegensatz zum vorherigen Aufbau wird hier nun eine 0°-Außenlage verwendet, sodass der Lagenaufbau nun folgendermaßen aussieht: [0/+45/90/-45/0/+45/90/-45]_s. Durch die Ausrichtung der Fasern der Oberflächenlage in die Belastungsrichtung, soll der frühzeitige Bruch eben dieser Lage nun verhindert werden. Diese Änderung wurde bereits von T. Löbel [13], bei dem ähnliche Probleme aufgetreten sind, erfolgreich angewendet.

Außerdem wird Überlappungslänge von 12,5mm auf 25mm erhöht um so der in der Literatur häufig verwendete und in Kapitel 4.1 beschriebenen Norm ASTM 5868 zu entsprechen und so eine bessere Vergleichbarkeit zu schaffen.

4.4 Fertigung

4.4.1 Laminatfertigung

Es soll eine rechteckige Laminatplatte mit einem Maß von 520mm x 330mm gefertigt werden. Diese Platte soll später für die Verklebung in acht Einzelplatten und nach dem Kleben wiederum in die einzelnen Couponproben geschnitten werden.

Im ersten Schritt werden aus dem Prepregmaterial die einzelnen Zuschnitte per CNC-Cutter ausgeschnitten.

Nach dem Zuschnitt werden die einzelnen Schichten per Hand zu einer Laminatplatte gelegt. Dies geschieht in einem Reinraum um Einschlüsse möglichst zu vermeiden. Die erste Lage wird an einem Winkel ausgerichtet und mit doppelten Klebeband auf dem Tisch fixiert. Die restlichen Lagen werden sowohl an dem Winkel als auch an den bereits liegenden Lagen ausgerichtet.

Auf das fertig gelegte Laminatpaket (Bild 4.5) wird ein eingetrenntes Deckblech gelegt und in Trennfolie eingeschlagen. Um den Luftfluss zu gewährleisten, werden dabei Glasfaserrovings an den Kanten aufgeklebt (Bild 4.6).



Bild 4.5: Gelegtes Laminatpaket



Bild 4.6: In Trennfolie eingeschlagenes Laminat

Im Anschluss wird der Vakuumaufbau vorbereitet. Hierfür wird das eingeschlagene Laminat auf ein Aluminium-Werkzeug gelegt. In diesem Fall eine einfache ebene Aluminiumplatte, die als Druckgegenstück fungieren soll um eine glatte, ebene Laminatfläche zu erzeugen. Die Platte wird danach mit Siegelkitt fixiert um ein verrutschen der Platte und einer möglichen Beschädigung der Vakuumfolie entgegen zu wirken.

Nach dem Platzieren der Glasnadelkissen und des Vakuumtellers wird der Aufbau mit Vakuumfolie bedeckt, welche wiederum mit Siegelkitt abgedichtet wird. Das Vakuumventil wird durch die Folie gestochen und mit dem Vakuumteller verbunden.

Der ganze Aufbau wird nun evakuiert und über Nacht kompaktiert um Lufteinschlüsse zu vermeiden.

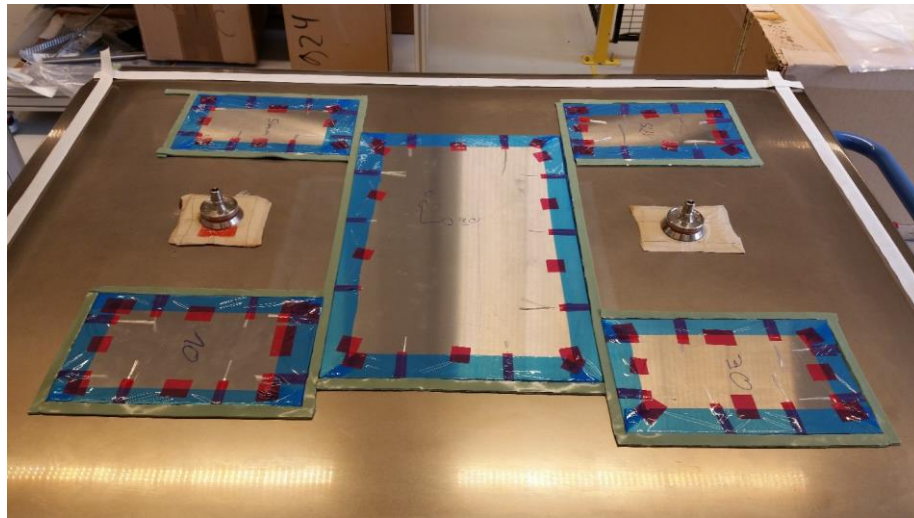


Bild 4.7: Vakuumaufbau (die kleineren äußeren Platten sind Bestandteil anderer Versuchsreihen)

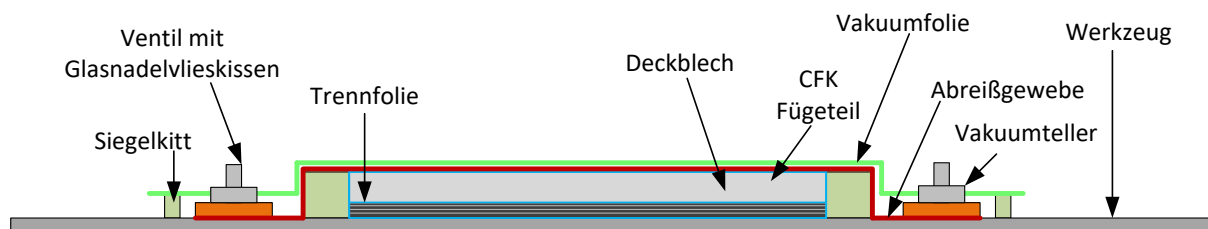


Bild 4.8: Vakuumaufbau für das Aushärten des Laminats

Das Aushärten des Laminats wird im Autoklav gemäß des Materialdatenblatts programmiert und durchgeführt.

Dabei wird zuerst der Vakuumaufbau mit dem Vakuum Anschluss des Autoklaven verbunden und ein volles Vakuum (ca. -1 Bar relativer Druck) hergestellt. Danach wird der Druck um 7 Bar erhöht, das Vakuum auf -0,2 Bar relativen Druck verringert und die Temperatur bei einer Aufheizrate von 1-3 K/min auf 110°C erhöht.

Diese Temperatur wird für ca. 60 Minuten gehalten und danach weiter wie vorher auf 180°C erhöht. Diese Temperatur wird für 120 Minuten gehalten bis die Temperatur bei

einer Abkühlrate von 2-5 K/min auf 60°C gesunken ist. Anschließend wird der Druck normalisiert und der Prozess ist vollendet. [12]

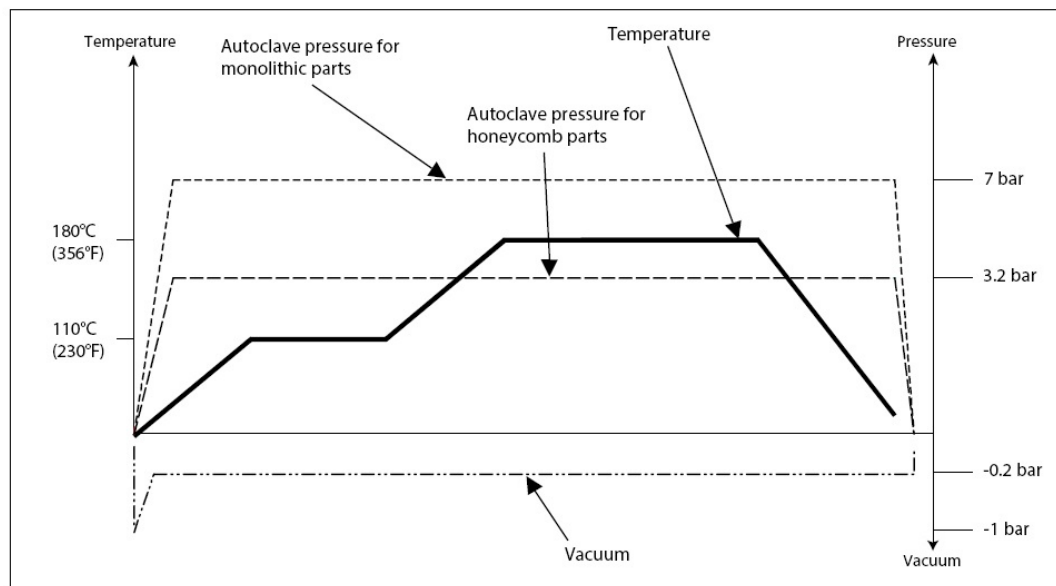


Bild 4.9: Aushärtezyklus Hexply 8552 [12]

Nach dem die Laminat Platte entformt und besäumt wurde erfolgt die Vorbereitung auf das Verkleben. Hierfür wird die Platte in acht Teile gesägt.

4.4.2 Fertigung der Fügevorrichtung

Um die gewünschten Klebegeometrien zu erhalten werden Vorrichtungen benötigt, die als Negativformen zu den Geometrien dienen sollen.

Da die Referenzreihe unbeeinflusst von einem möglichen Klebstoffauslauf sein soll, wird für diese Reihe ein einfaches 2mm Dickes rechtwinkliges 150mm x 105mm Aluminiumblech verwendet. Dieses liegt bündig an den Überlappungsenden an und verhindert so den Kleberauslauf auf einer Seite.

Für die Dreieckige Kleberkehle wird eine 45° Fase in die anliegende Kante des Blechs gefräst.

Für die Bogenförmige Kleberkehle wird ein 2mm Radius in die anliegende Kante des Blechs gefräst.

Die Reihe mit den angefasten Fügeteilen erhält keine Fügevorrichtung, sodass der Kleber nicht am auslaufen gehindert wird.

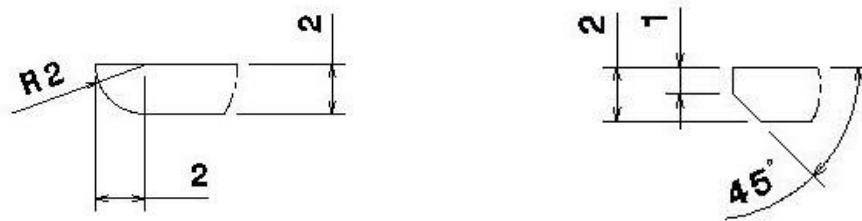


Bild 4.10: Definierende Kanten der Fügevorrichtung links Bogen rechts Dreieck

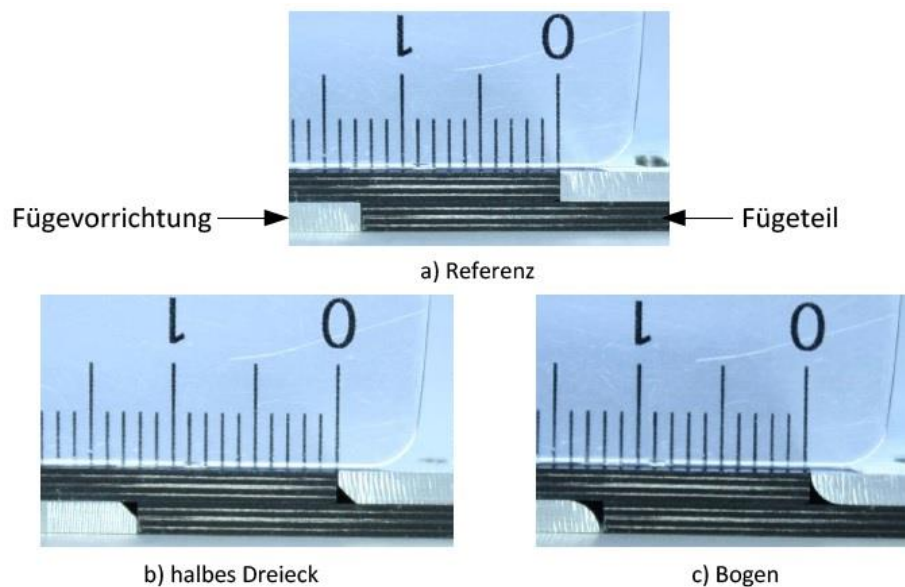
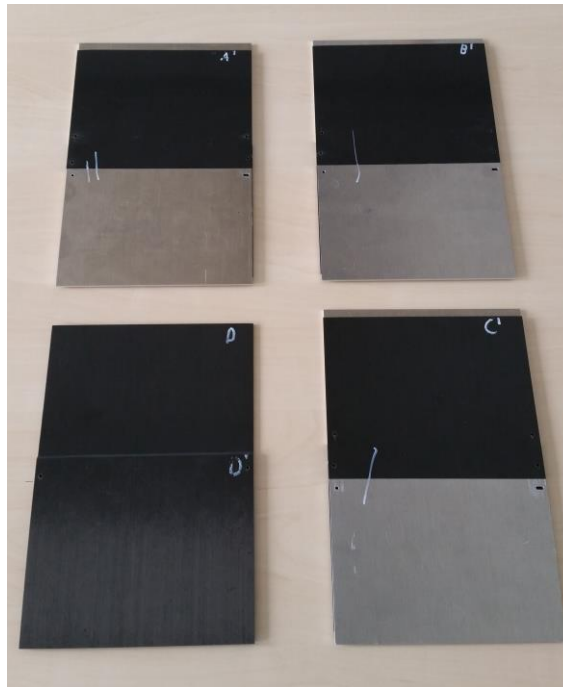


Bild 4.11: Fügevorrichtungen [10]

Um die Fügevorrichtungen fixieren zu können werden insgesamt 6 Löcher in den Randbereich des Aufbaus gebohrt. Durch diese werden später Zylinderstifte gesteckt. Zwei Bohrungen werden durch den Überlappungsbereich der Fügeteile gebohrt und je zwei direkt daneben durch die Fügevorrichtung und das Fügeteil. Bei jeweils einer Bohrung pro Fügevorrichtung handelt es sich um ein Langloch, dass die Thermische Ausdehnung des Blechs ausgleichen soll.

Die 45°Fase der Probenreihe RT_4 wird mittels einer Tellerschleifmaschine erzeugt.

**Bild 4.12: Füge Teile mit Fügevorrichtung und Bohrungen**

4.4.3 Verkleben

Vor dem Verkleben müssen die zu verklebenden Oberflächen vorbehandelt werden. Um für eine bestmögliche Adhäsion zu sorgen wird hier die Atmosphärendruckplasma-Vorbehandlung angewendet.

Tabelle 4.2: Parameter für die Plasmavorbehandlung

Parameter	Wert
Frequenz	23 kHz
Spannung	280 V
Düsengeschwindigkeit	100 mm/s
Volumenstrom	2670 l/h
Düsenkopf	PTF 2645-2
Reihenabstand	3mm
Düsendistanz	15mm

Direkt nach der Oberflächenvorbehandlung wird der Filmklebstoff aufgebracht und die Fügeiteile, über die Zylinderstifte, ausgerichtet und verbunden. Anschließend werden auch die Fügevorrichtungen über die Zylinderstifte mit den Fügeiteilen verbunden.

Um eine möglichst gute und gleichmäßige Klebschicht zu erreichen wird der Klebstoff im Autoklav ausgehärtet. Hierfür wird der in Bild 4.13 dargestellte Vakuumaufbau hergestellt um mögliche Lufteinschlüsse in der Klebschicht zu vermeiden. Der Klebstoff wird dann unter einem Druck von 3 Bar und einer Temperatur von 130°C 150 Minuten lang ausgehärtet.

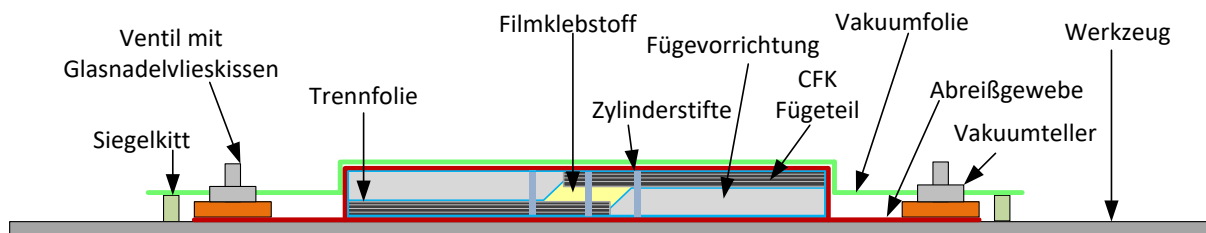


Bild 4.13: Vakuumaufbau für die Verklebung (Beispiel: dreieckige Kleberkehle)

Nach dem entformen und besäumen der verklebten Platten werden die einzelnen Proben herausgeschnitten und auf ihr Sollmaß zugeschnitten.

Bedingt durch einen höher ausfallenden Verschnitt als erwartet, fallen einige Proben schmaler aus als ursprünglich geplant.

4.4.4 Untersuchung der Proben

Um die Proben beurteilen zu können und die nötigen Parameter für die Berechnung der Klebfestigkeit zu ermitteln, werden die Proben zunächst genau vermessen.

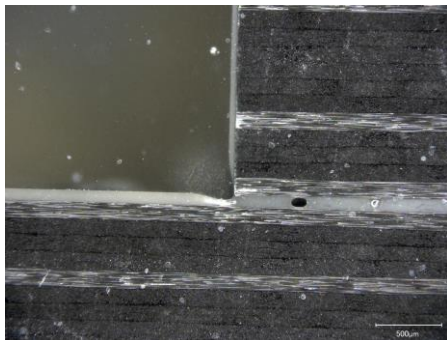
Die einzige Auffälligkeit ist hier die Breite der Proben die, wie in Kapitel 4.4.3 bereits beschrieben, schmaler ausfallen als die geplanten 25mm. Die durchschnittliche Breite der Proben beträgt 24,91mm wobei die schmalste Probe lediglich 24,75mm bemisst. Die Gesamten Messergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen.

Um die Qualität der Klebung und der Klebegeometrie zu beurteilen werden zusätzlich Schliffproben aus den Randstücken, die durch das besäumen entstanden sind angefertigt.

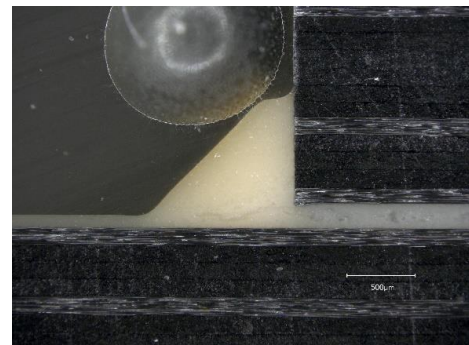
In Bild 4.14: Mikroskopaufnahmen der Klebegeometrien der Schliffproben erkennt man gut, dass der Kleberauslauf wie gewünscht geformt wurde. Die Dreieck- und Bogenform entsprechen der geplanten Geometrien sehr genau. Lediglich wenige Proben weisen Deformationen siehe Bild 4.14: Mikroskopaufnahmen der Klebegeometrien der Schliffproben b.) und d.) oder Lufteinschlüsse siehe Bild 4.14: Mikroskopaufnahmen der Klebegeometrien der Schliffproben a.) und c.) auf.

An den Überlappungsenden der angefasten Proben (Bild 4.14: Mikroskopaufnahmen der Klebegeometrien der Schliffproben d.)) hat sich ein Bogenförmiger Klebstoffauslauf gebildet der einen sehr großen Radius hat. Außerdem kann man bei allen Proben erkennen, dass ein Teil des Klebstoffes unter die Fügevorrichtung geflossen ist.

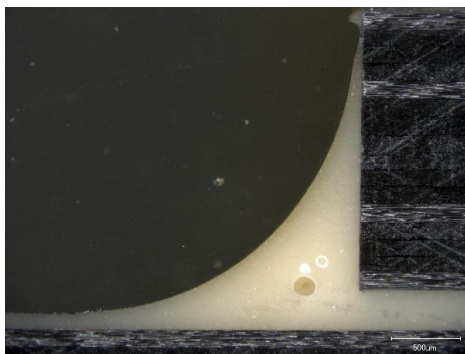
a.) Referenzreihe



b.) Dreieck



c.) Bogen



d.) Fase

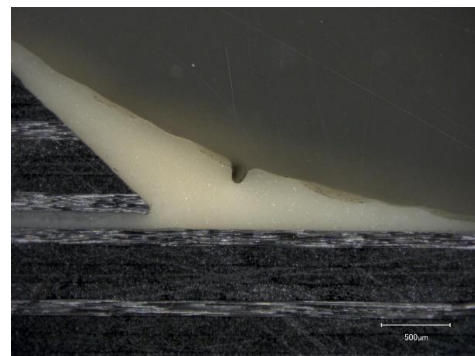


Bild 4.14: Mikroskopaufnahmen der Klebegeometrien der Schliffproben

5 Experimentelle Untersuchung

Um die Spannungsreduzierende Wirkung der Probenreihen untersuchen zu können wird ein Zugscherversuch durchgeführt. Dabei wird der traversen Weg und die Zugkraft aufgezeichnet. Zusätzlich werden die Verformungen der Proben mittels optischer Messsysteme aufgenommen und später analysiert. Zusätzlich ist jeweils eine Probe jeder Reihe mit einem Dehnungsmesstreifen (DMS) ausgestattet, um eine bessere Analyse bei einem Fügeiteilbruch zu ermöglichen.

5.1 Versuchsbeschreibung und Aufbau

Die Prüfung findet im statischen Prüflabor des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR statt. Verwendet wird hier eine Zugprüfmaschine des Typs Zwick/Roell 1484 mit einer Maximalkraft von 250 kN. Die Vorkraft bei diesen Versuchen beträgt 50 N. Eingespannt werden die Proben durch hydraulische Spannbacken. Die Traversengeschwindigkeit beträgt 1 mm/min. Das Prüflabor ist klimatisiert und hält während der Versuche eine Temperatur von 24°C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 50%.

Für die optische Messung wird das ARAMIS-System der Firma GOM eingesetzt. Hierfür wird eine hochauflösende Digitalkamera (Sony Alpha 7R III) vor dem Überlappungsbereich fixiert. Zusätzlich werden flexible Lampen auf den Bildbereich gerichtet um eine möglichst gute und gleichbleibende Ausleuchtung zu erreichen.

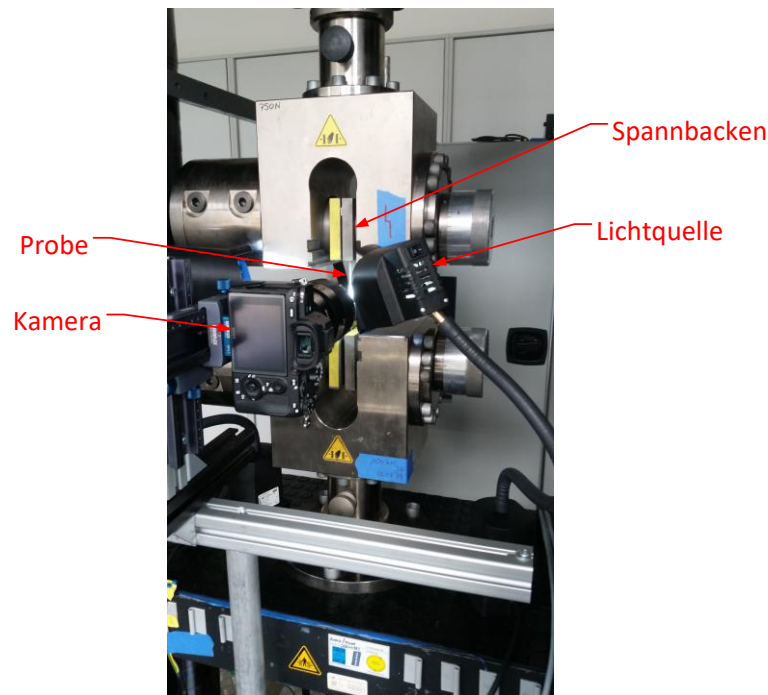


Bild 5.1: Versuchsaufbau

5.2 Durchführung

Insgesamt werden 40 Proben geprüft 20 davon gehören zu dieser Arbeit. Um die Verformung mit dem ARAMIS-System analysieren zu können werden alle Proben lackiert um so ein eindeutiges stochastisches Muster zu erzeugen. Die Proben mit den laufenden Nummern 1-4 erhalten dabei ein grobes und die Proben mit der 5 ein feines Muster. Zusätzlich werden bei den Proben 1,3 und 4 der Gesamte Überlappungsbereich und bei den Proben mit der Nummer 5, nur der Randbereich aufgenommen.

5.3 Beobachtung

Während der Prüfungen kann man auf der Digitalkamera sehr gut die Neigung, die durch das auftretende Biegemoment entsteht, erkennen.

Der Bruch der Proben erfolgt plötzlich und mit einem Knall. In seltenen Fällen kann man ein leises Knistern kurz vor dem bruch vernehmen.

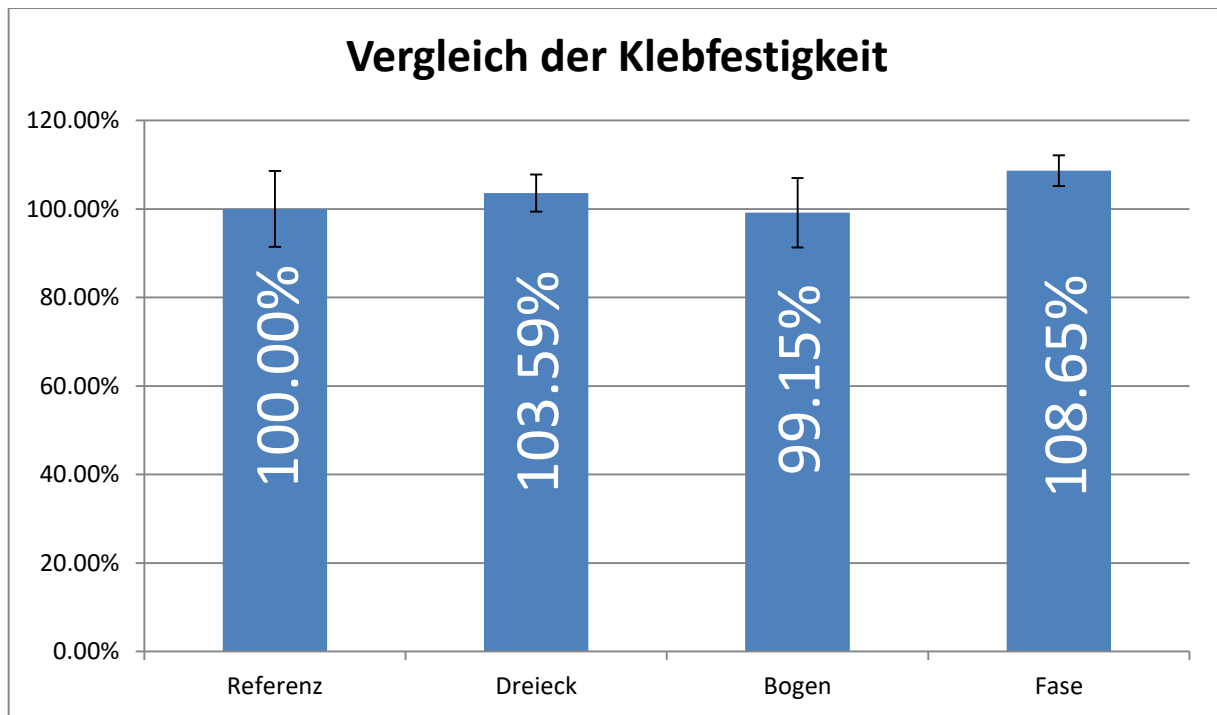
5.4 Ergebnisse und Vergleich der Spannungen

In der Tabelle 5.1 sind sowohl die von der Prüfmaschine aufgenommene Bruchkraft (F_{Br}), die aus der gemessenen Länge und Breite der Überlappung errechnete Klebefläche (A_K), sowie der Klebefestigkeit, die sich gemäß Formel (5.1) [14] errechnet.

$$\tau_K = \frac{F_M}{A_K} \quad (5.1)$$

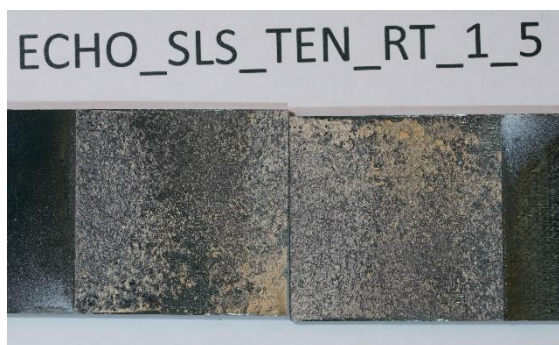
Tabelle 5.1: Messergebnisse

Probennummer	Prüfungsergebnisse		
	F_{Br} [N]	A_K [mm ²]	τ_K [Mpa]
Referenzreihe			
ECHO_SLS_TEN_RT_1_1	11.118	628.13	17.70
ECHO_SLS_TEN_RT_1_2	14.329	628.90	22.78
ECHO_SLS_TEN_RT_1_3	13.725	626.14	21.92
ECHO_SLS_TEN_RT_1_4	13.581	625.13	21.72
ECHO_SLS_TEN_RT_1_5	12.033	594.28	20.25
Mittelwert	12.957		20.88
Dreieck			
ECHO_SLS_TEN_RT_2_1	12.290	601.77	20.42
ECHO_SLS_TEN_RT_2_2	14.152	620.64	22.80
ECHO_SLS_TEN_RT_2_3	13.961	620.66	22.49
ECHO_SLS_TEN_RT_2_4	13.121	621.37	21.12
ECHO_SLS_TEN_RT_2_5	13.239	620.34	21.34
Mittelwert	13.353		21.64
Bogen			
ECHO_SLS_TEN_RT_3_1	13.384	589.97	22.69
ECHO_SLS_TEN_RT_3_2	12.277	619.64	19.81
ECHO_SLS_TEN_RT_3_3	12.763	622.79	20.49
ECHO_SLS_TEN_RT_3_4	11.346	623.46	18.20
ECHO_SLS_TEN_RT_3_5	13.932	623.83	22.33
Mittelwert	12.740		20.70
Fase			
ECHO_SLS_TEN_RT_4_1	14.351	632.65	22.68
ECHO_SLS_TEN_RT_4_2	13.560	631.44	21.47
ECHO_SLS_TEN_RT_4_3	14.391	630.28	22.83
ECHO_SLS_TEN_RT_4_4	14.247	632.30	22.53
ECHO_SLS_TEN_RT_4_5	14.921	623.15	23.94
Mittelwert	14.294		22.69



5.5 Bruchbild

Das Bruchbild der hier untersuchten Proben ist relativ einheitlich. Alle Proben sind kohäsiv gebrochen. Auffällig ist, dass einige Proben mit Kleberauslauf auch einzelne Faserausrisse aufweisen. Außerdem sind die Klebstoff-Geometrien bei fast allen Proben auch nach dem Bruch noch intakt.



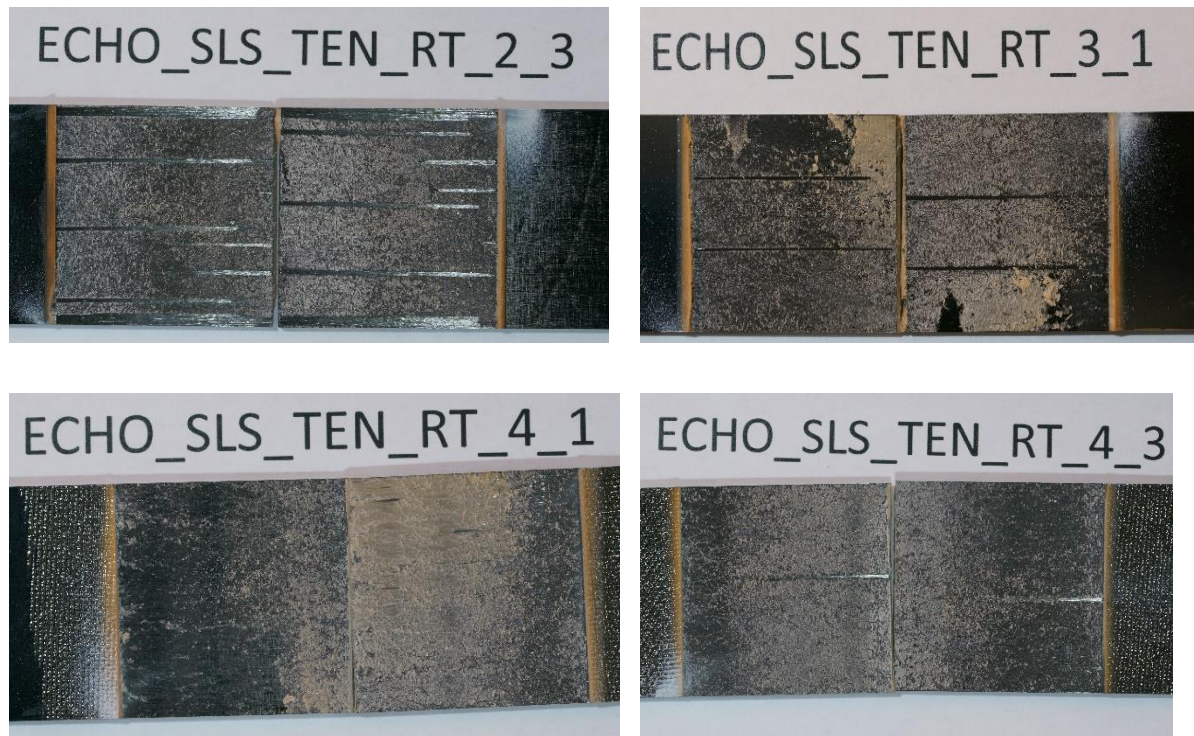


Bild 5.2 Beispiele für die Bruchbilder der einzelnen Versuchsreihen

5.6 Aramis Auswertung

In Bild 5.4 und Bild 5.5 sieht man die Ergebnisse der digitalen Bildkorrelation mit dem Aramis-System. Das System kann unterschiedliche Arten von Dehnungen berechnen und darstellen. In dieser Arbeit wird die „Schäldehnung“ also die Dehnung senkrecht zur Klebstoffebene Bild 5.5 sowie eine „Vergleichsdehnung“ Bild 5.4, die sich an der Gestaltänderungsenergiehypothese nach v. Mises orientiert, betrachtet.

Im Bild 5.4 erkennt man, dass sowohl an der Dreieckgeometrie der Probenreihe RT_2 sowie an der Bogengeometrie RT_3 ein Riss senkrecht zur Klebefläche entstanden ist, der die Klebegeometrie von dem anliegenden Füge teil trennt. Ansonsten treten die größten Dehnungen, wie bei der Referenzprobe, im Randbereich der Klebung auf.

Die Geometrien selbst weisen nur sehr geringe Verfärbungen und damit Dehnungen auf. Bei den angefas ten Proben hingegen sieht man leichte Dehnungen innerhalb des Klebstoffauslaufes. Außerdem ist eine Rissbildung an der Spitze der Anfasung zu erkennen von wo aus auch die größten Dehnungen entlang der Füge teil kannten verlaufen.

Die einzige Probe die sich von diesen Beobachtungen unterscheidet ist die Probe ECHO_SLS_TEN_RT_4_2. Bei dieser Probe sieht man einen großen Riss, der von einer Fehlstelle im Klebstoffauslauf aus in die Klebschicht läuft.

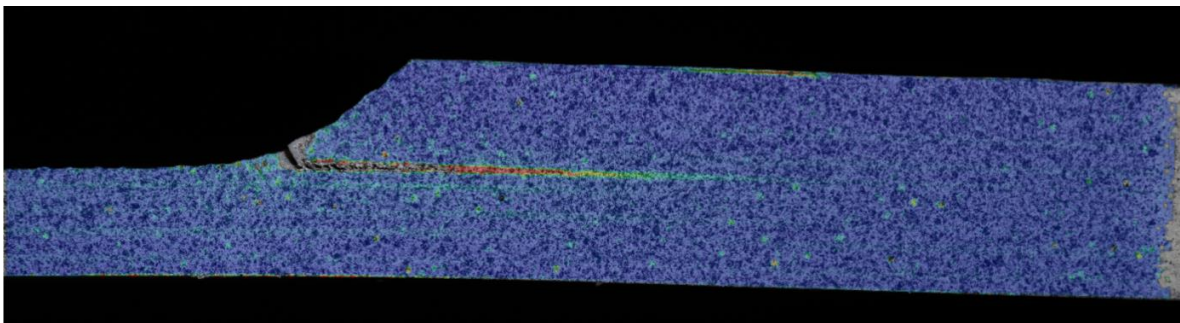


Bild 5.3: Dehnungen der Probe ECHO_SLS_TEN_RT_4_2

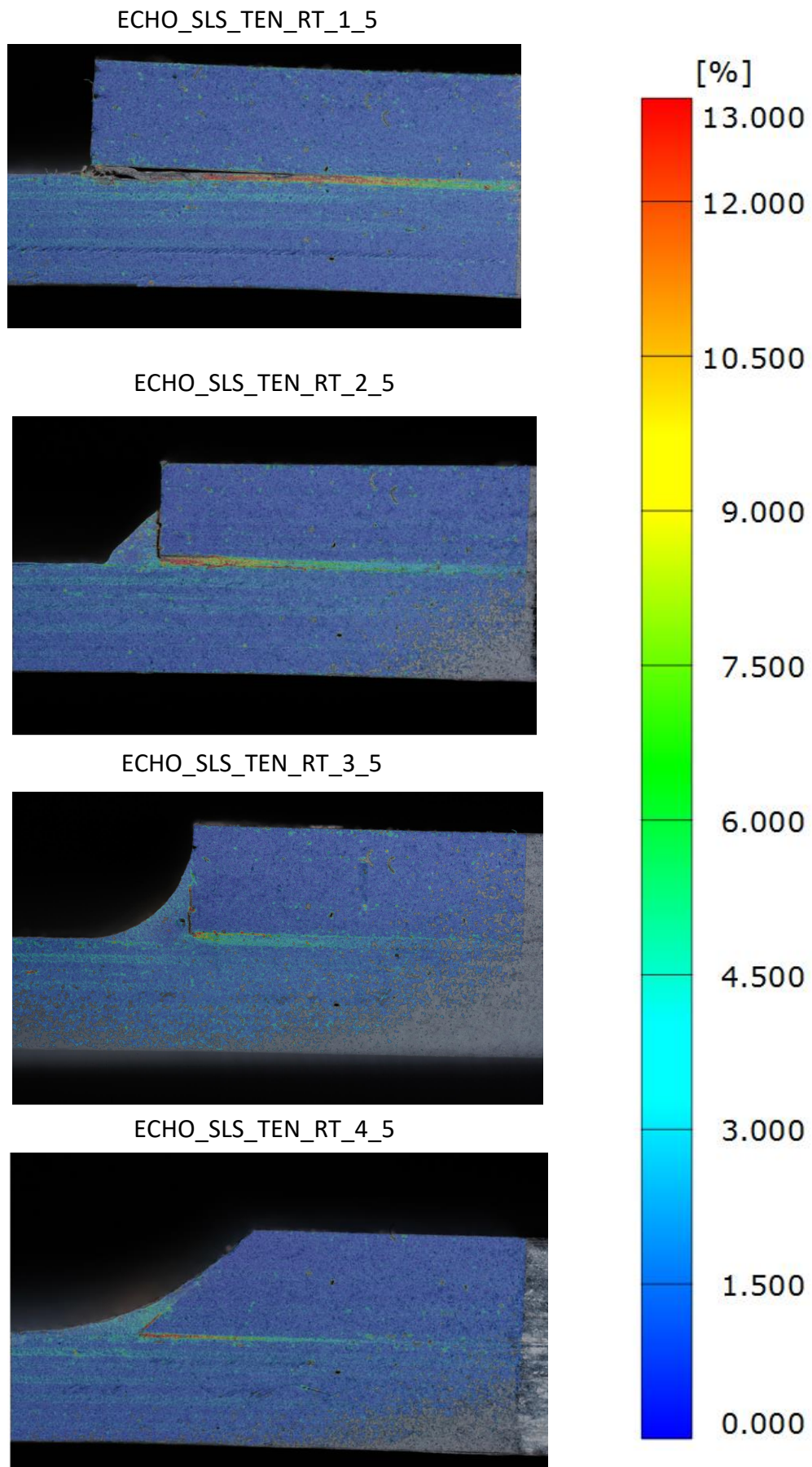
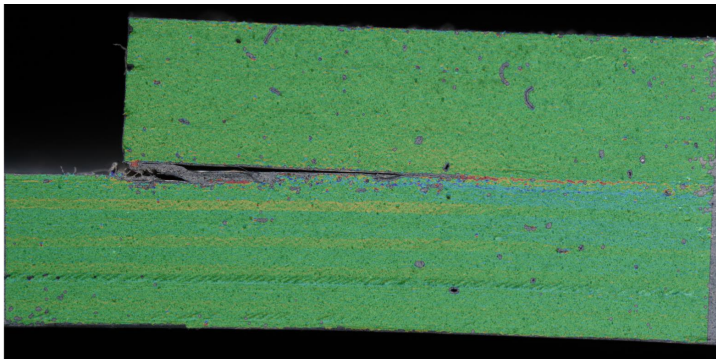
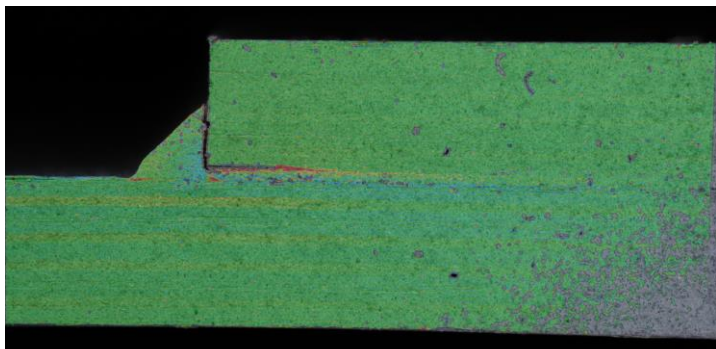


Bild 5.4: Vergleich der Dehnung kurz vor dem Bruch nach v. Mises

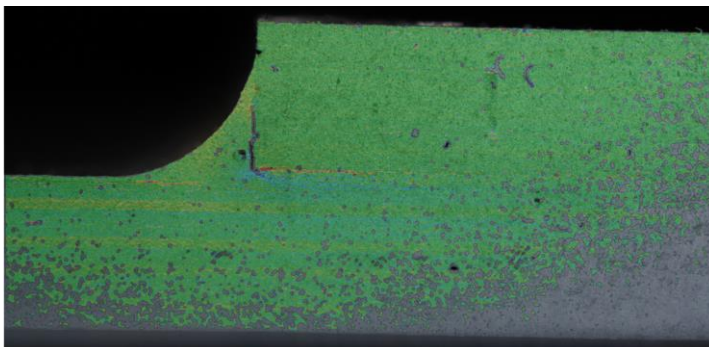
ECHO_SLS_TEN_RT_1_5



ECHO_SLS_TEN_RT_2_5



ECHO_SLS_TEN_RT_3_5



ECHO_SLS_TEN_RT_4_5

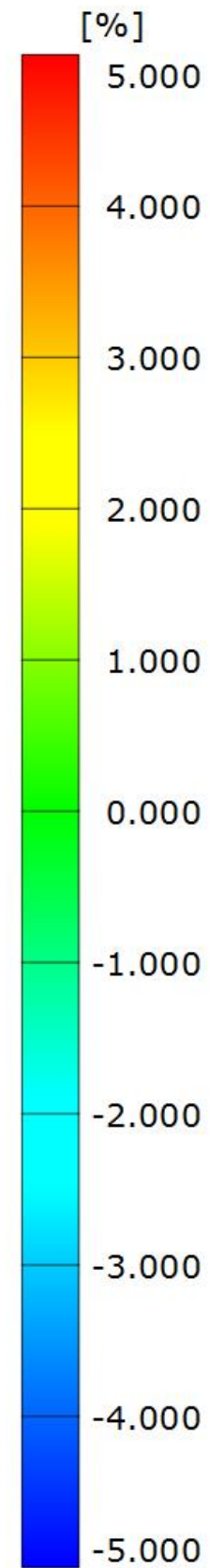
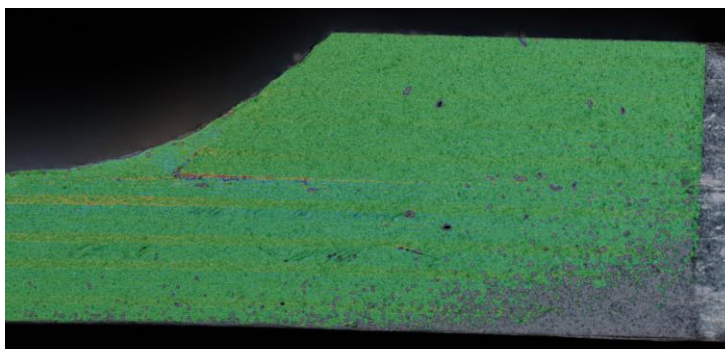


Bild 5.5: Vergleich der „Schäldehnungen“ kurz vor dem Bruch

6 Diskussion

Die Ergebnisse aus Kapitel 5.4 zeigen nur eine geringe bis keine Steigerung der Klebefestigkeit gegenüber Referenzreihe.

Auch die ARAMIS Aufnahmen zeigen, dass es nur sehr geringe Dehnungen in den Kleberkehlen gibt. Außerdem ist bei allen Proben ein Risswachstum von der Fügeitecke aus zu erkennen. (Bild 6.1)

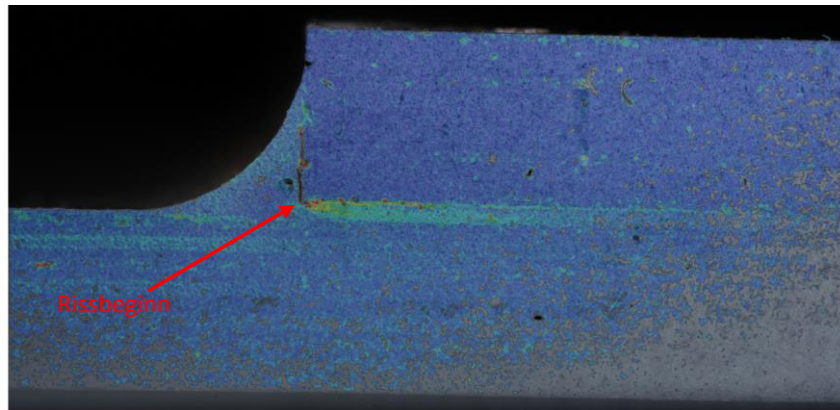


Bild 6.1: Rissbildung bei der Probe ECHO_SLS_TEN_RT_3_5

Das durchgehend kohäsive Bruchverhalten mit geringen Faserausrissen zeigt kein besonderes Bruchverhalten. Lediglich die vollständig intakten Geometrien zeigen, dass diese nicht hoch belastet wurden.

Die größte Steigerung zeigt die Reihe mit der Fase mit einer Steigerung von rund 9%. Die ARAMIS Aufnahmen bestätigen dies insofern, dass der Kleberauslauf hier am höchsten gedehnt wurde. Das Ergebnis hätte auch noch etwas höher ausfallen können, wenn man Ergebnisse der Probe ECHO_SLS_TEN_RT_4_2 aus der Mittelwerts Berechnung herausnehmen würde. Diese Probe zeigt das schlechteste Ergebnis welches durch die Fehlstelle in dem Kleberauslauf erklärt werden kann. Dies zeigt auch das Risswachstum aus Bild 5.3: Dehnungen der Probe ECHO_SLS_TEN_RT_4_2

Die zweithöchste Steigerung liefert der dreieckige Kleberauslauf mit einer Steigerung von 4%. Der bogenförmige Kleberauslauf reduziert sogar die Klebefestigkeit um etwa 1%.

Diese Ergebnisse liegen weit unter den berechneten Werten aus der Arbeit von Lang und Mallick (siehe Kapitel 3.2).

7 Fazit und Ausblick

Die Theorie der Spannungsreduktion durch Formen des Kleberauslaufes kann in dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Lediglich der Klebstoffauslauf der Proben mit Fase zeigen in den ARAMIS-Aufnahmen Dehnungen.

Die Kombination aus einer Kleberkehle und einer Fase könnte jedoch eine größere Spannungsreduktion zur Folge haben und sollte untersucht werden.

Außerdem könnte man die Versuche mit den Materialien, die Lang und Mallick in ihren Berechnungen eingesetzt haben wiederholen. Dabei handelte es sich um ein SMC Glasfaserverbund sowie einen Epoxidklebstoff, der einen etwas höheren E-Modul aufweist als der in dieser Arbeit verwendete.

8 Literatur

- [1] Dr. Elmar Witten (AVK) & Alfons Schuster, „Der Composites-Markt Europa: Marktentwicklungen, Herausforderungen und Chancen“.
- [2] H. Schürmann, *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [3] I. Pires, L. Quintino, J. F. Durodola und A. Beevers, „Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints“, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Jg. 23, Nr. 3, S. 215–223, 2003.
- [4] H. Özer und O. Öz, „Joint Stress Optimization by the Hybrid Adhesive Lap Joint“, *AMR*, Jg. 445, S. 1000–1004, 2012.
- [5] Ö. Öz und H. Özer, „An experimental investigation on the failure loads of the mono and bi-adhesive joints“, *Journal of Adhesion Science and Technology*, Jg. 31, 19-20, S. 2251–2270, 2017.
- [6] A. Matting und U. Draugelates, „Die Schwingfestigkeit von Metallklebungen“, *Adhäsion*, Nr. 12, 1968.
- [7] A. R. Rispler, L. Y. Tong, G. P. Steven und Wisnom, „Shape optimisation of adhesive fillets“, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Jg. 20, Nr. 3, S. 221–231, 2000.
- [8] T. P. Lang und P. K. Mallick, „Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints“, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Jg. 18, Nr. 3, S. 167–177, 1998.
- [9] *Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding*, ASTM 5868-01, 2014.
- [10] H. S. Sowka, „Experimentelle Untersuchungen von festigkeitssteigernden Maßnahmen an Überlappungsklebung mit Filmklebstoffen“.
- [11] Henkel Corporation, „LOCTITE EA 9695 AERO: Epoxy Film Adhesive“, Bay Point, CA 94565 USA. [Online] Verfügbar unter: https://www.henkel-adhesives.com/us/en/product/adhesives/loctite_ea_9695_aero.html. Zugriff am: 09.12.2018 10:00.
- [12] Hexcel Corporation, „HexPly 8552 Product Datasheet: Epoxy matrix (180°C/356°F curing matrix)“, 2016. [Online] Verfügbar unter: <https://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg>. Zugriff am: 09.12.2018 10:00.
- [13] T. Löbel, *The hybrid bondline: A novel disbond-stopping design for adhesively bonded composite joints*. Braunschweig, 2016.

- [14] H. Wittel, H. Roloff und W. Matek, *Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung*, 19. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009.

9 Anhang

Probennr.	Prüfbedingungen					
	Norm	Prüfart	Prüfmaschine	Prüfbedingung	DMS	ARAMIS
ECHO_SLS_TEN_RT_1_1	angelehnt an ASTM 5868	TEN	Zwick/Roell 1484	24°C; 50% rel. Feu.		ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_1_2						Rand grob
ECHO_SLS_TEN_RT_1_3					x	ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_1_4						ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_1_5						fein
ECHO_SLS_TEN_RT_2_1						ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_2_2						Rand grob
ECHO_SLS_TEN_RT_2_3					x	ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_2_4						ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_2_5						fein
ECHO_SLS_TEN_RT_3_1						ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_3_2						Rand grob
ECHO_SLS_TEN_RT_3_3					x	ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_3_4						ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_3_5						fein
ECHO_SLS_TEN_RT_4_1						ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_4_2						Rand grob
ECHO_SLS_TEN_RT_4_3					x	ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_4_4						ganz
ECHO_SLS_TEN_RT_4_5						fein

Geometrie					
t[mm]	b[mm]	L _ü [mm]	t _a	A _a [mm ²]	Auffälligkeiten
4.106	25.118	25.01	0.1316	628.13	kleine Fehlstelle
4.205	25.136	25.02	0.1460	628.90	
4.270	25.117	24.93	0.1892	626.14	
4.201	25.126	24.88	0.1343	625.13	kleine Fehlstelle
4.146	23.909	24.86	0.1323	594.28	
4.108	24.097	24.97	0.0964	601.77	
4.087	25.054	24.77	0.0570	620.64	
4.098	24.956	24.87	0.0611	620.66	kleine Fehlstelle
4.094	25.022	24.83	0.0581	621.37	
4.079	25.040	24.77	0.0960	620.34	
4.002	23.726	24.87	0.0903	589.97	kleine Fehlstelle
4.013	24.910	24.88	0.0507	619.64	Fehlstelle
4.062	25.061	24.85	0.0537	622.79	
4.030	25.079	24.86	0.0549	623.46	
4.060	25.132	24.82	0.1143	623.83	
4.180	25.208	25.10	0.1135	632.65	
4.133	25.169	25.09	0.0578	631.44	
4.121	25.156	25.06	0.0534	630.28	
4.122	25.171	25.12	0.0631	632.30	
4.142	25.180	24.75	0.1007	623.15	

Prüfungsergebnisse			
F[N]	τ [Mpa]	Auffälligkeiten	Aramisbeobachtungen
11.118	17.70		Dehnung direkt in der Klebschicht Rissbildung am Überlappungsende vor Bruch
14.329	22.78		
13.725	21.92		
13.581	21.72		
12.033	20.25	Knistern vor Bruch	
12.290	20.42		Rissbildung am Überlappungsende horizontal und vertikal keine Verteilung in der Klebegeometrie
14.152	22.80		
13.961	22.49		
13.121	21.12	Knistern vor Bruch	
13.239	21.34	Knistern vor Bruch	
13.384	22.69		Rissbildung am Überlappungsende horizontal und vertikal keine Verteilung in der Klebegeometrie
12.277	19.81		
12.763	20.49		
11.346	18.20		
13.932	22.33		
14.351	22.68		Verteilung in der Klebegeometrie Rissbildung einseitig am Ende der Überlappung entlang der Fase
13.560	21.47		
14.391	22.83		
14.247	22.53		
14.921	23.94		